大振幅下における圧電セラミックの力学的挙動 (圧電セラミックトランスの場合)*

生 島 弘 志**

Mechanical Behavior of Piezoelectric Ceramics under Large Amplitude Operation (The Piezoelectric Ceramic Transformer Case)

by

Hiroshi IKUSHIMA

(Wireless Research Laboratory Matsushita Electric Industrial Co. Ltd., Kadoma)

Mechanical properties of piezoelectric ceramic transformers were investigated as an example of the dynamic behavior of piezoelectric ceramics under large amplitude operation. The static and dynamic strengths were measured on the driver and generator sections of the transformer. The difference in heat production between the sections was recognized, which proved to be derived from an orientation discrepancy between the poling and stressing directions.

A large non-linearity common to the mechanical strength and the heat-generation phenomenon was found to be associated with the non-linearity in resonance characteristics of resonators.

Mechanical fracture of piezoelectric ceramic transformers, which is the ultimate event under large amplitude stress, occurred mainly in the secondary portion. This phenomenon is understandable from the difference in static tensile strength between the primary and secondary portions.

The mechanical strength of piezoelectric ceramics also depended on their grain size as in the case of other ceramics. The propagation path of the crack generated was transgranular or intergranular depending upon grain size. Griffith cracks were hardly observed in any specimen tested. The existence of etch pits, which may be due to dislocations, was discovered for the first time in piezoelectric ceramics. Strain-hardening was also recognized.

From the above experimental results, a new model for the mechanical break-down mechanism in piezoelectric ceramics was proposed.

(Received Mar. 24, 1981)

キー・ワード：圧電セラミック，非線形現象，破壊機構

1 序 論

圧電セラミックは，素体に印加される電気信号によって応力が発生し，逆に素体に応力が加わると電気信号を発生するもので，磁気セラミックと並んで能動的な機能を有するセラミックである。電子回路における圧電セラミックは，フィルタや振動子のように，比較的小振幅下において使用されるので，その力学的挙動を問題とされることは少い。しかるに，圧電セラミックの応用分野が広がるにつれて，超音波トランスデューサーを代表例として大振幅下での使用が増えつつある。

本分野における従来の研究は，代表的な圧電セラミ

ックである PZT セラミックにおいて，機械的質係数^{1)~7)} (Q_M) の挙動を中心に行われてきた。しかし，圧電セラミックの大振幅下での力学的挙動の正確な把握には未だ及ばざる所が多い。例えば，動的変位を直接に観察した報告はなく，したがって振動モードを直観的に把えることもなされないままである。一方，圧電振動子の小型化を図る限り非線形性の問題を避けて通れない。内部摩擦は非線形性を支配する重要な因子であるが，この定義があいまいなままで使用されており，物性論的考察がない。したがってあくまで現象論に留まり⁵⁾⁶⁾，実体の把握に努めていない。藤島らは，圧電セラミック振動子の応力限界や許容入力について，先駆的仕事を発表している。しかしながら，エネルギー密度を振動子の断面積当りで考えるのは正しくなく，かつ

* 原稿受理 昭和56年3月24日

** 正 会 員 松下電器産業(株)無線研究所 門真市大字門真

それを素体全体に積分しても意味がない。なぜなら、共振状態にある振動子では、常に応力極大点があり、その近傍での力学的挙動こそが、材料強度学的立場および振動論の立場の双方にとって本質的なものだからである。高橋らは、電圧一定数を大振幅下で連続測定しながら、非線形性の問題や内部摩擦への立入った考察を怠っている。更に、機械的な破壊機構についての正確なデータに基づく考察も未だなされていない。

圧電セラミックトランスは、C.A. Rosen⁸⁾によって最初に考案されたもので、電気-機械および機械-電気変換の両機能を一体化してかつ大振幅下で発揮する点でその力学的挙動が大いに注目されてよい。

2 理 論

2・1 圧電トランスの構成

圧電トランスは Rosen⁸⁾以来、多くの研究者によって実用化が試みられてきている。^{9)~11)} 圧電トランスの構成と動作を一言にして表すならば、一次側に蓄えた静電エネルギーを逆の圧電効果によって弾性エネルギーとして二次側に伝送し、一次側の静電容量に比べて二次側のそれを充分小さくすることにより、二次側で正の圧電効果により高い出力電圧を得ようとするもので、一次側と二次側の各部分は通常一体化されている。これを図で示せば Fig. 1 のようなものである。斜線で示した電極を用いて矢印(P)の方向に分極処理して始めて圧電トランスとして機能し得るものとなる。実際の使用回路では、二次側に整流と負荷の両回路が接続される。

Fig. 1. Figure of piezoelectric transformer.

本研究で用いられた素材は、二成分系の PZT と同じ鉛酸化物であるが、三成分系である点に特長を有する強誘電セラミックである（以下、PCM と略称する）。¹²⁾

2・2 圧電トランスの動作基本方程式

圧電トランスの基本動作を規定するものは、圧電基本式と Newton の運動方程式である。Fig. 1 の素体の長さ方向のみの振動変位を取り扱う一軸近似を採用することにより、一次側は d -形式、二次側は g -形式をそれぞれ用いて次式のように表される。すなわち、

$$T_1 = (1/s_{11}^E) \cdot S_1 - (d_{31}/s_{11}^E) \cdot E_3; \partial E_3 / \partial x = 0 \quad (\text{一次側}) \quad (1)$$

$$T_3 = (1/s_{33}^D) \cdot S_3 - (g_{33}/s_{33}^D) \cdot D_3; \partial D_3 / \partial x = 0 \quad (\text{二次側}) \quad (2)$$

(1), (2)式において添字 (1~3) は、Fig. 1 のトランス素体の各部分における P_1 , P_2 の各方向を添字 3 とした場合に対応する。ただし、 x -軸は各部分に共通で

素体の長さ方向に採っている。

2・3 等価回路設計における問題点

トランスとして所要の昇圧比を得るためには、(1), (2)式と Newton の運動方程式から等価回路を導き、¹³⁾ 負荷条件に応じた形状設計を行う必要がある。テレビジョン受像機において用いられる昇圧トランスの場合は、特に小型化と高効率駆動が要求される。¹⁴⁾ したがってかかる際には非線形領域にまで立入った設計が必要となる。¹⁵⁾ 等価回路設計に際しては、負荷回路をどの程度まで精細に考慮して採り入れるか（例えば浮遊容量等）によって、トランスの形状寸法にも無視できない効果が現れる。¹⁵⁾ いずれにせよ前提となる仮定は次の四つである。

(1) トランス素体の長さ方向の振動変位に比べて幅および厚みの各方向のそれは無視できる程度に小さい（一軸近似）。

(2) 駆動部と発電部の Q_M は等しいものとする。すなわち、

$$Q_{M(d)} \simeq Q_{M(g)}$$

(3) 駆動部と発電部の機械的特性インピーダンスが等しい。すなわち

$$\rho_a v_a A_{(d)} = \rho_g v_g A_{(g)} \quad (v: \text{速度}, A: \text{断面積})$$

(4) 駆動部と発電部の長さ方向の位相伝ば量が等しい。すなわち

$$L_d v_a = L_g v_g$$

3 実 験 結 果

3・1 圧電セラミックの機械的強度

3・1・1 圧電セラミックにおける各種の強度

圧電トランスは、動作中に毎秒 10⁴Hz 以上という短い周期で、引張りと圧縮の繰返し荷重をうける。セラミックにおいては、一般にその圧縮強度 (σ_c) は引張強度 (σ_t) の数十倍にも及ぶので、¹⁶⁾ 圧電トランスの強度を規定するものは σ_t であると言える。ところで、セラミック一般に σ_t の測定は簡単でなく従来から曲げ強度 (σ_b) が代用されてきた。筆者らも、当初各種の PCM 材について σ_b を測定して Table I の結果を得た。Table I の結果および既に公表されている圧電セラミックのデータから筆者は次の半実験式を得た。すなわち、

Table I. Bending strength in piezoelectric ceramics.

	PCM-71	PCM-80
Grain size (μ)	2~ 7	0.5~ 3
Primary portion (kg/cm ²)	1250~1270	1440 ~1460
Secondary portion (kg/cm ²)	900~ 920	760 ~ 780

$$\sigma_t/2 = (\sigma_b + \sigma_c/m) \cdot (1+m)^{-1}, \quad (m=9\sim 10) \quad (3)$$

(3)式から推定される σ_t は PCM セラミックにおいて、

Table II. Material constants of the specimen.

	Density (ρ : kg/m ³)	Poisson's ratio (σ)	S_{11}^E (m ² /N)	S_{33}^D (m ² /N)	d_{31} (m/V)	g_{33} (V · m/N)
PCM-71	7 700	0.29 ₀	12.2 × 10 ⁻¹²	9.31 × 10 ⁻¹²	-126 × 10 ⁻¹²	25.6 × 10 ⁻³
PCM-80	7 900	0.28 ₂	11.4 × 10 ⁻¹²	7.75 × 10 ⁻¹²	-121 × 10 ⁻¹²	25.5 × 10 ⁻³

Fig. 2. Tensile strain versus tensile stress.

300 kg/cm² 以上と見積られる。Table I で明らかなことは二次側の σ_2 が一次側に比べて小さいということである。したがって、圧電トランスの強度の推定は二次側において行えば充分であり、改めてこの部分の引張試験を行って実測値 320 kg/cm² を得た。

この結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 はいずれの試片もほぼ 320 kg/cm² という引張応力下で破断した（記号 F で示されている）ことを示している。興味深いのは、引張応力の増加とともにひずみ-応力の直線性がやや非直線化することで、塑性変形の可能性を示唆している。この問題は 3・4 節で改めて考える。

3・1・2 圧電トランスにおける応力 圧電トランスの動作条件は、素片の全長に定在する音波の波長(λ)の数によりさまざまに分れる。全長に一波長が定在する 1 モードでは、一次側および二次側の各部分の長さ方向に沿った中央付近に応力の極大点が存在する。実際には、機械的破壊の大部分が二次側のほぼ中央近傍に集中する。これには、大きく二つの理由が考えられる。

(1) 残留ひずみの方向が、二次側では応力の方向と同じである。トランス素材の圧電セラミック (PCM) は、元来変位型の強誘電性セラミックで自発ひずみをもっている。したがって、応力の方向に平行なひずみが内在している二次側は、同一応力下でも一次側より破壊しやすいと推定される。

(2) 動作中では、二次側の応力が一次側のそれより大きいと考えられる。これを圧電基本式から見積ってみよう。そのために必要な材料定数を Table II に与えておく。実は、(1), (2) 式の右辺の第 2 項はそれぞれ

第 1 項に比べ約 2 桁小さい量であり無視できて次式を得ることができる。すなわち、

$$T_1/T_3 = (S_1/S_3) \cdot (s_{33}^D/s_{11}^E) \quad (4)$$

一方、変位の連続性から、

$$u_1 = L_1 S_1 = u_3 = L_3 S_3$$

$$\therefore S_1/S_3 = L_3/L_1 \quad (5)$$

更に、前節で述べた四つの仮定の内、筆者らによるトランス表面のクラド=図形の観測により確められた位相伝ば量の連続性から、

$$L_1/v_1 = L_3/v_3 \quad (6)$$

(4)~(6)式から

$$T_3/T_1 = (v_1/v_3) (s_{11}^E/s_{33}^D) = (s_{11}^E/s_{33}^D)^{1/2} \quad (7)$$

ただし、一様媒質として $\rho_d = \rho_g (\rho_1 = \rho_3)$ としている。Table II からわかるとおり、 s_{33}^D は s_{11}^E に比べ約 20~30% 小さいので(7)式から、二次側部分での最大応力(T_3)は一次側のそれ(T_1)より十数% 以上大きくなることがわかる。

つぎに二次側の最大応力は一次側入力電流に比例することが等価回路設計により知られており、これを実験的に確めた結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3. Dynamic stress & strain versus input current.

3・2 圧電トランスにおける発熱現象

3・2・1 圧電トランスにおけるエネルギーの流れ

圧電トランスにおけるエネルギーの流れは、Fig. 4 のときのものであり、出力における放電や音響および電磁波の輻射エネルギーは極めて小さいことが実験的に知られ、また圧電トランスに定在している振動のエネルギーも計算から出力の千分の一以下と知れる。そこで、圧電トランスにおけるエネルギー変換効率を評価するには Fig. 4 における熱エネルギーを測定することが必要である。

Fig. 4. Energy transfer in piezoelectric transformer.

3・2・2 発熱の空間分布 圧電トランスの動作中における発熱の状態は、被観測系を観測によってできる限り乱さないという philosophy に基づいて、一定時間の動作終了直後に、赤外放射温度計によって静止状態における空間分布として捉えた。λモードにお

Fig. 5. Spatial distribution of heat-generation in λ-mode (in length direction).

る代表的な結果を Fig. 5 に示す。同図における ΔT は、実測温度から雰囲気温度を差し引いたものである。従来、圧電トランスの発熱の空間分布をトランスの全長にわたって測定した例はなく Fig. 5 によって我々もまた始めて一次側と二次側部分における明確な差異を知ったのである。これらの発熱は、 180° -分域壁の法線方向に応力が働き、圧電効果に伴うひずみによって壁の面積が変化し、結晶の異方性のエネルギーが摩擦熱として解放されると考えられる。異方性のエネルギーは、圧電トランス素体が強誘電性セラミックで本来自発ひずみによる弾性エネルギーを有することから生ずるのである。

3・3 圧電トランスにおける非線形現象

3・3・1 振動子の共振特性 圧電トランスにおけるエネルギー変換効率を最も端的に示すものは Q_M の大振幅特性である。Table II に示した PCM セラミックからなり Fig. 1 のごとき形状の試片において、一次側部分は出力端開放の条件下で、二次側部分は出力端

に負荷が接続された条件下での特性の代表例を Fig. 6 (a), (b)にそれぞれ示す。曲線の peak 値は、圧電体としての共振インピーダンスに対応して標準抵抗に流れる電流値に相当するものであり、パラメータとして示した励振電圧が増加するにつれ、その振幅が一定の割合で増加しなくなり、共振周波数が低周波側へずれることがわかる。これらの現象は、圧電体における非線形現象として知られている。非線形性を論ずるには、

(a) Driver portion (PCM-71)

(b) Generator portion (PCM-80)

Fig. 6. Large amplitude property of Q_M in piezoelectric ceramic transformer.

まずその系の線形限界点を見定めることが必要と思われるが、Fig. 6 に示したように Q_M の大振幅特性は出力端に接続される負荷回路によって相当大幅に変わるものである。したがって、一定動作条件下における線形限界点を比較的正確に知ることが難しくなり一義的に Q_M ないしは内部摩擦 (Q_M^{-1}) を得ることも困難となる。

3・3・2 異常温度上昇と線形限界 大振幅振動下の圧電セラミックの発熱は、セラミック内部に定在する弾性エネルギーの一部が内部摩擦によって熱エネルギーに転換したものと考えてよい。Fig. 3 に示したように、ひずみ（または応力）は入力電流に一次比例するから内部損失としての熱エネルギーは入力電流に二次比例すると予想される。そこでこの両者の関係を求めた結果の代表例がFig. 7 である。Fig. 7 から求めた線形限界点における発熱による温度上昇分とひずみ-応力を Table III に示す。Table III における ΔT と S は実測値であり、 T はこの S を圧電基本式(1), (2)に代入し

Fig. 7. Surface temperature increase versus input current.

Table III. Critical points of linear region (PCM-80).

	ΔT (°C)		S (μ strain)		T (kg/cm ²)	
	Driver	Generator	Driver	Generator	Driver	Generator
A	$\lesssim 25$	$\lesssim 10.4$	$\lesssim 150$	$\lesssim 150$	$\lesssim 134$	$\lesssim 193$
B	$\lesssim 25$	$\lesssim 10$	$\lesssim 183$	$\lesssim 160$	$\lesssim 160$	$\lesssim 204$
C	$\lesssim 25$	$\lesssim 14$	$\lesssim 150$	$\lesssim 133$	$\lesssim 134$	$\lesssim 163$

(A: $56L \times 7W \times 3.5T$, B: $75L \times 20W \times 3T$, C: $85L \times 12W \times (2.3 \times 3)T$, unit: mm)

Table IV. Internal friction of piezoelectric transformer (PCM-80).

	Q_M^{-1}		Q_M	
	Driver	Generator	Driver	Generator
A	$\approx 1.1 \times 10^{-8}$	$\approx 3.5 \times 10^{-4}$	$\approx 0.9 \times 10^8$	$\approx 2.8 \times 10^8$
B	$\approx 1.0 \times 10^{-8}$	$\approx 3.7 \times 10^{-4}$	$\approx 1.0 \times 10^8$	$\approx 2.7 \times 10^8$
C	$\approx 1.6 \times 10^{-8}$	$\approx 8.7 \times 10^{-4}$	$\approx 0.6 \times 10^8$	$\approx 1.1 \times 10^8$

て求めた。なお、Fig. 7 は Table III の試料 C の場合に相当する。更に、トランス各部の応力最大点における単位体積当りの熱エネルギー (E_{thermal}) と弾性エネルギー (E_{elastic}) を Table III のデータを用いて計算し、内部摩擦を一周期の間に弾性エネルギーの熱に変る割合として、本来の物理的な意味に立ち帰って求めた結果が Table IV である。Table IV によって、従来不明確であった圧電セラミックの内部摩擦が明確に定義されたことになる。なお、Table IV の Q_M は圧電トランスの各部分を個別な素体として電氣的に測定した値とよく一致した。これによって、非線形現象は単位体積当たりある一定量以上のエネルギーを内部摩擦によって損失することによって生ずるという解釈が得られる。

3・4 圧電トランスにおける破壊の様相

3・4・1 マイクロ・クラック伝ばの様相 セラミック一般のごとく、機械的強度の粒径依存性を調べることは甚だ困難な作業である。岡崎らは、この困難な仕事に精力的に取り組み、金属や一般のセラミックにおけると同様な強度の粒径依存性を実験的に得ている。我々の実験に用いた試料では、引張強度 (σ_t) で PCM-71 に比べて粒径の小さい PCM-80 が約 10% 近く、大きな値を有するという結果を示し、粒径の大小によって、マイクロ・クラック伝ば径路が粒界および粒内に分れる。¹⁸⁾

3・4・2 ひずみ-硬化の現象 3・1・1 節における Fig. 2 の結果を仔細に見ると、わずかな塑性変形の後、破断に到る前の段階で若干の変形応力の増加が認められる。一定荷重の引張試験を、トランスの二次側素片に対して繰返し行なったところ、一種のひずみ-硬化の効果が現れた。¹⁸⁾

3・4・3 エッチピットの発見と破壊機構 圧電セラミックが常温・常圧で塑性変形を起すとすれば、内部に動き得る転位が存在してもよい。更にグリフィス・クラックの存在がほとんど認められないことから、ガラスや特にもろいセラミック等と言われるグリフィス・クラック模型は、圧電セラミックの破壊機構に対しては適用され難いことになる。そこで、転位に対応すると予想されるピットの発見に努めた。新しい腐食液^{*}を用いて強誘電セラミックでは始めて、エッチピットが見出された。¹⁸⁾⁽²²⁾

これらのピットの一定応力下での可動性を調べることはできなかったが、応力変化に伴う密度の変化は観察できた。¹⁸⁾

あえて、我々の観察したピットを転位によるものとすれば、圧電セラミックの内でも特に高密度・高効率の電気-機械変換媒体としての PCM セラミックの破

* 修酸溶液にかなりのフッ酸を混入したもの。分域や粒径観察に常用される腐食液は微量のフッ酸入り硝酸溶液。

壊機構としては、グリフィス・クラック模型ではなく、転位模型の可能性が大きいと言えよう。すなわち、破壊の起点は、セラミック粒界の移動集積し得る転位により発生したマイクロ・クラックであり、破壊の形式は完全な脆性ではなく、マイクロ・塑性の可能性があるので、延性的性質も有すると言える。

4 結 論

本研究によって得られた結果を以下に要約する。

4・1 圧電トランスに特有なこと

(1) トランスの二次側に生じる最大応力は、一次側のそれより若干大きいために、トランスの破壊は二次側の最大応力点近傍に集中する。

(2) 内部摩擦による振動子としての非線形性や発熱は、二次側より一次側において著しい。

(3) 等価回路模型は、上記の結果を本来予測できない。したがって、トランスの設計に際して本研究のような物理的アプローチの助けを借りて補正を行うことが大切である。

4・2 圧電セラミック一般に共通すること

(1) 圧電セラミックの内部摩擦に主として寄与するのは、誘電損失や振動のエネルギーではなく、強誘電セラミックの分域壁の運動である。

(2) 微小粒径を有する高密度・高効率圧電セラミックは大振幅下でマイクロ・塑性変形を示し、その破壊機構は若干の延性を持ち、転位模型の可能性がある。

(3) 圧電セラミックにおける非線形現象および機械的破壊は、セラミック素体の単体の単位体積当りに蓄えられる弾性エネルギーが一定限界を越えたときに起る。

本研究によって、大振幅下にある圧電セラミックの力学的挙動はかなり明確になったと言えよう。

本研究の成果は、当社で数年前になされた圧電トランスの開発過程で得られたもので、筆者に本研究の機会を与えられた当社技術部長早川取締役ならびに、結果の発表を許可された当社開発本部長兼無線研究所所長飯田常務取締役に深甚の謝意を表します。

材料の提供に対しては、当社材料研究所大内主幹研究員と西田研究員に、等価回路模型の教示に対しては、同じく伊勢室長に、また実験の協力に対しては同じく黄地研究員にそれぞれ感謝します。

(昭和56年3月13日 第5回セラミック材料部門委員会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Gerson, R., J. Acous. Soc. Amer., **32**, 1297 (1960).
- 2) Krueger, H. H. A., and D. Berlincourt, J. Acous. Soc. Amer., **33**, 1339 (1961).
- 3) 藤島 啓, 笥 流石, 電子通信学会・超音波研究専門委員会資料 (1962).
- 4) Whymark, R. R., J. Acous. Soc. Amer., **45**, 587 (1969).
- 5) Yamauchi, F., and M. Takahashi, J. Phys. Soc. Japan., **28**, 313 (1970).
- 6) 高橋純夫, 森 栄司, 日本音響学会誌, **29**, 100 (1973).
- 7) 八嶽和夫, 電子通信学会論文誌, **J60-A**, 978 (1977).
- 8) Rosen, C. A., Proc. Elec. Comp. Symp., 205 (1956).
- 9) Katz, H. W., "Solid State Magnetic & Dielectric Device", Chap. IV (1959) John Wiley & Sons. Inc., New York
- 10) 土屋英俊, 電学誌, **81**, 603 (1961).
- 11) Van Berkum, P. A., *et al.*, I. R. E. Trans. on B. T. R. **8**, 22 (1962).
- 12) Ohuchi, H., *et al.*, J. Amer. Ceram. Soc., **48**, 630 (1965).
- 13) Berlincourt, D. A., *et al.*, "Physical Acoustics", Chap. 3 (1964) ed. by Mason, W. P., Academic Press, New York & London
- 14) 安細恭弘, 森木寿夫, 1973年テレビジョン学会予稿集, **10-15**, 281 (1973).
- 15) 要 祐一, 伊勢悠紀彦, 日本音響学会誌, **32**, 470 (1976).
- 16) 岡崎 清, "セラミック誘電体工学", 第10章 (1969) 学献社
- 17) Ikushima, H., and K. Ohji, Japanese J. Appl. Phys., **13**, 28 (1974).
- 18) Ikushima, H., and K. Ohji, Proc. 1st Meeting on Ferroelectric Materials and Their Applications, 211 (1978).
- 19) Stokes, R. J., "Ceramic Microstructures", Chap. 16 (1968) ed. by Fulrath, R. M., and J. A. Pask, John Wiley & Sons. Inc., New York
- 20) Davidge, R. W., and A. G. Evans, Mater. Sci. Eng., **6**, 281 (1970).
- 21) 岡崎 清, 永田邦裕, 電子通信学会・電子回路部品・材料研究会資料, 資料番号 CPM 71-21 (1971).
- 22) 生島弘志, 日置康弘, 他, 日本物理学会講演, 誘電体部門, 255 (1973).